

Würde Albert einem GPS vertrauen?

Relativitätstheorie im Alltag

Daniel Arnold

Eine Nacht mit Albert
Bernisches Historisches Museum

3. Juni 2016

Was ist GPS?

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem

Was ist GPS?

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



Was ist GPS?

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



Was ist GPS?

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

Was ist GPS?

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

Was ist GPS?

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



Was ist GPS?

GPS = Globales Positionierungs-System



Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

Was ist GPS?

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

Was ist GPS?

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



Was ist GPS?

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



Was ist GPS?

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



Was ist GPS?

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

Was ist GPS?

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

Was ist GPS?

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

Was ist GPS?

GPS = **G**lobales **P**ositionierungs-**S**ystem



Was ist GPS?

GPS

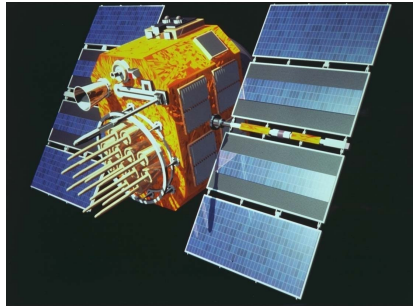
- ermöglicht die genaue Positionsbestimmung
 - global
 - jederzeit
 - wetterunabhängig
- wurde seit 1973 vom amerikanischen Militär entwickelt
- kostet im Unterhalt rund 750 Millionen USD pro Jahr
- wurde und wird von anderen Nationen “kopiert”:
 - Russland: GLONASS
 - China: BeiDou
 - Europa: Galileo
 - ...

1. Wie funktioniert GPS?
2. GPS und die Relativitätstheorie
 - Würde Albert einem GPS einfach so vertrauen?
3. Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

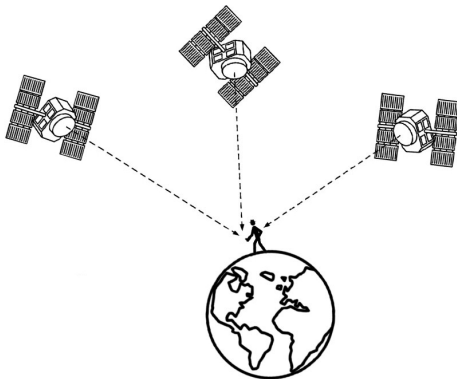
Wie funktioniert GPS?

Wie funktioniert GPS?

- GPS basiert zurzeit auf 32 Satelliten, welche die Erde in 20'200 km Höhe zweimal pro Tag umkreisen
- Jeder Satellit sendet laufend ein Funksignal Richtung Erde

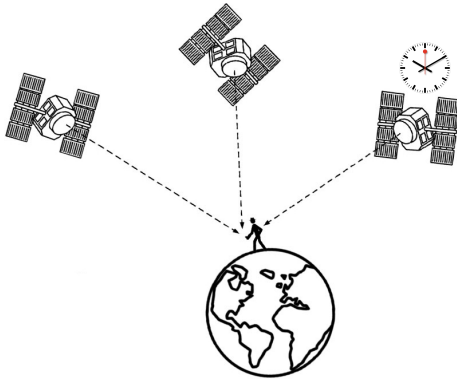


Wie funktioniert GPS?



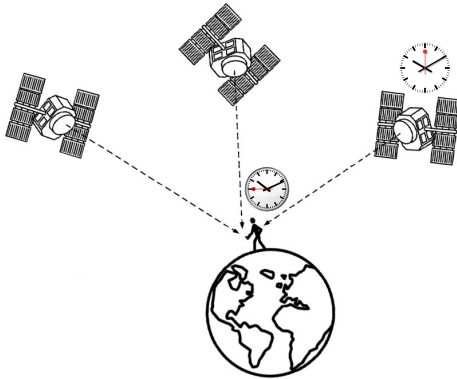
- Die Funksignale fliegen mit Lichtgeschwindigkeit $c = 300'000 \text{ km/sec}$ vom Satelliten zum Empfänger.

Wie funktioniert GPS?



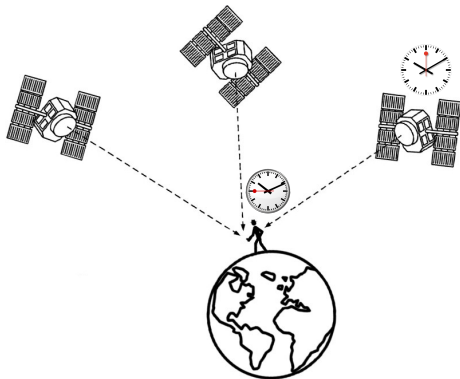
- Die Funksignale fliegen mit Lichtgeschwindigkeit $c = 300'000 \text{ km/sec}$ vom Satelliten zum Empfänger.
- Jeder Satellit hat eine hochgenaue Uhr an Bord. Im Funksignal steht, wann dieses den Satelliten verlassen hat.

Wie funktioniert GPS?



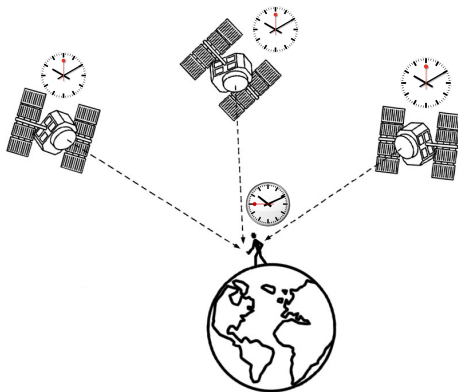
- Die Funksignale fliegen mit Lichtgeschwindigkeit $c = 300'000 \text{ km/sec}$ vom Satelliten zum Empfänger.
- Jeder Satellit hat eine hochgenaue Uhr an Bord. Im Funksignal steht, wann dieses den Satelliten verlassen hat.
- Auch der Empfänger hat eine Uhr und er kann darum die Zeit rechnen, die das Signal unterwegs war.

Wie funktioniert GPS?



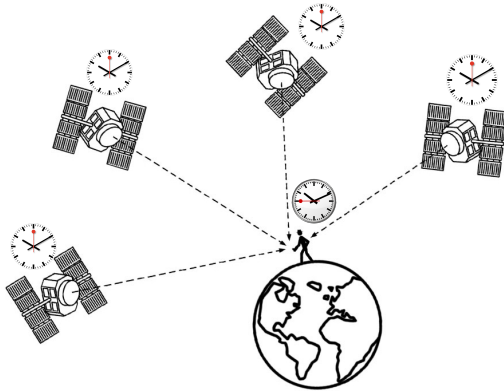
- Die Funksignale fliegen mit Lichtgeschwindigkeit $c = 300'000 \text{ km/sec}$ vom Satelliten zum Empfänger.
- Distanz = $\text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$

Wie funktioniert GPS?



- Die Funksignale fliegen mit Lichtgeschwindigkeit $c = 300'000 \text{ km/sec}$ vom Satelliten zum Empfänger.
- Distanz = $\text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$
- Distanz zu drei Satelliten ergibt Position als Schnittpunkt im dreidimensionalen Raum

Wie funktioniert GPS?



- Die Funksignale fliegen mit Lichtgeschwindigkeit $c = 300'000 \text{ km/sec}$ vom Satelliten zum Empfänger.
- Distanz = $\text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$
- Distanz zu drei Satelliten ergibt Position als Schnittpunkt im dreidimensionalen Raum
- Uhr im Empfänger meist zu ungenau und muss auch bestimmt werden
→ vierter Satellit

Wie funktioniert GPS?

- Die GPS-Satelliten fliegen so, dass überall auf der Welt zu jeder Zeit mindestens vier Satelliten am Himmel sichtbar sind.

Wie funktioniert GPS?

- Die GPS-Satelliten fliegen so, dass überall auf der Welt zu jeder Zeit mindestens vier Satelliten am Himmel sichtbar sind.
- Es müssen diverse Einflüsse berücksichtigt werden, wie z.B. dass die Funksignale in der Atmosphäre abgelenkt und verlangsamt werden.

Wie funktioniert GPS?

- Die GPS-Satelliten fliegen so, dass überall auf der Welt zu jeder Zeit mindestens vier Satelliten am Himmel sichtbar sind.
- Es müssen diverse Einflüsse berücksichtigt werden, wie z.B. dass die Funksignale in der Atmosphäre abgelenkt und verlangsamt werden.
- Mit alltäglichen GPS-Empfängern liegt die Positionsgenauigkeit bei einigen Metern.



Wie funktioniert GPS?

- Die GPS-Satelliten fliegen so, dass überall auf der Welt zu jeder Zeit mindestens vier Satelliten am Himmel sichtbar sind.
- Es müssen diverse Einflüsse berücksichtigt werden, wie z.B. dass die Funksignale in der Atmosphäre abgelenkt und verlangsamt werden.
- Mit alltäglichen GPS-Empfängern liegt die Positionsgenauigkeit bei einigen Metern.
- Mit aufwendigen Empfängern erreicht man weniger als 1 cm.



Wie funktioniert GPS?

GPS basiert also auf Distanzmessungen zu Satelliten, wofür hochgenaue **Uhren** auf den Satelliten verwendet werden.

Wie funktioniert GPS?

GPS basiert also auf Distanzmessungen zu Satelliten, wofür hochgenaue **Uhren** auf den Satelliten verwendet werden.

Einstein und **Uhren**...

Wie funktioniert GPS?

GPS basiert also auf Distanzmessungen zu Satelliten, wofür hochgenaue **Uhren** auf den Satelliten verwendet werden.

Einstein und **Uhren**...

... da war doch was !?

Wie funktioniert GPS?

GPS basiert also auf Distanzmessungen zu Satelliten, wofür hochgenaue **Uhren** auf den Satelliten verwendet werden.

Einstein und **Uhren**...

... da war doch was !?

Würde Albert einem GPS einfach so vertrauen?

GPS und die Relativitätstheorie

GPS und die Relativitätstheorie

Albert Einstein hat in seinen beiden Relativitätstheorien zwei für GPS sehr wichtige Vorhersagen gemacht:

GPS und die Relativitätstheorie

Albert Einstein hat in seinen beiden Relativitätstheorien zwei für GPS sehr wichtige Vorhersagen gemacht:

Spezielle Relativitätstheorie (1905)

Uhren, die sich bewegen, gehen langsamer

GPS und die Relativitätstheorie

Albert Einstein hat in seinen beiden Relativitätstheorien zwei für GPS sehr wichtige Vorhersagen gemacht:

Spezielle Relativitätstheorie (1905)

Uhren, die sich bewegen, gehen langsamer

GPS-Satelliten fliegen mit rund 3.9 km/sec oder 14'000 km/h um die Erde

GPS und die Relativitätstheorie

Albert Einstein hat in seinen beiden Relativitätstheorien zwei für GPS sehr wichtige Vorhersagen gemacht:

Spezielle Relativitätstheorie (1905)

Uhren, die sich bewegen, gehen langsamer

GPS-Satelliten fliegen mit rund 3.9 km/sec oder 14'000 km/h um die Erde

Allgemeine Relativitätstheorie (1916)

Uhren in einem Schwerefeld gehen langsamer

GPS und die Relativitätstheorie

Albert Einstein hat in seinen beiden Relativitätstheorien zwei für GPS sehr wichtige Vorhersagen gemacht:

Spezielle Relativitätstheorie (1905)

Uhren, die sich bewegen, gehen langsamer

GPS-Satelliten fliegen mit rund 3.9 km/sec oder 14'000 km/h um die Erde

Allgemeine Relativitätstheorie (1916)

Uhren in einem Schwerfeld gehen langsamer

GPS-Satelliten fliegen auf 20'200 km Höhe, wo die Schwerkraft nur etwa ein Viertel des Wertes auf der Erde beträgt

Bewegte Uhren gehen langsamer

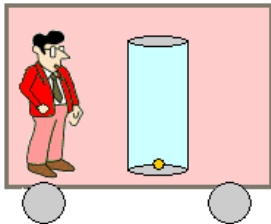
Die Lichtgeschwindigkeit ist **IMMER** gleich gross, $c = 300'000 \text{ km/sec}$

Bewegte Uhren gehen langsamer

Ein “Gedankenexperiment” ...

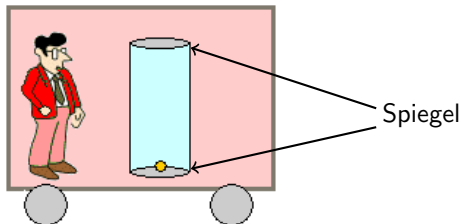
Bewegte Uhren gehen langsamer

Ein "Gedankenexperiment" ...



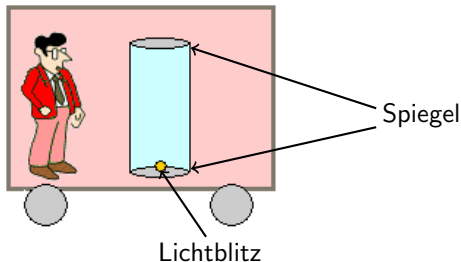
Bewegte Uhren gehen langsamer

Ein "Gedankenexperiment" ...



Bewegte Uhren gehen langsamer

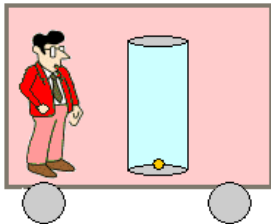
Ein "Gedankenexperiment" ...



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

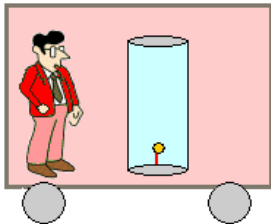
Die Uhr steht still



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

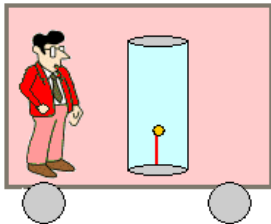
Die Uhr steht still



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

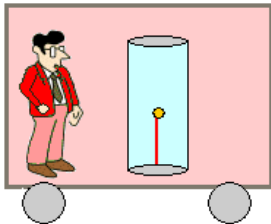
Die Uhr steht still



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

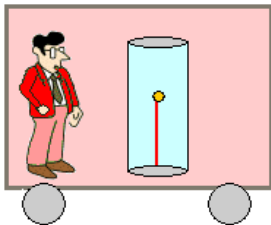
Die Uhr steht still



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

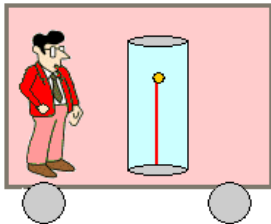
Die Uhr steht still



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

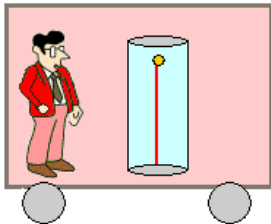
Die Uhr steht still



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

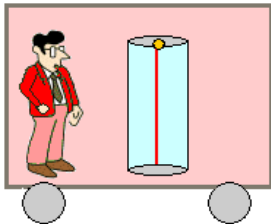
Die Uhr steht still



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

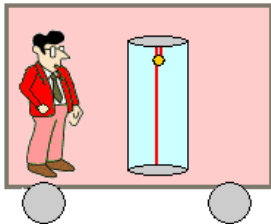
Die Uhr steht still



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

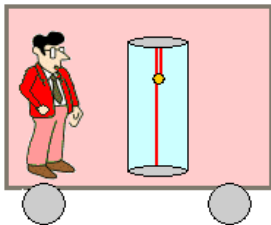
Die Uhr steht still



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

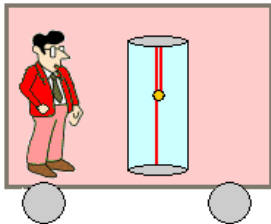
Die Uhr steht still



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

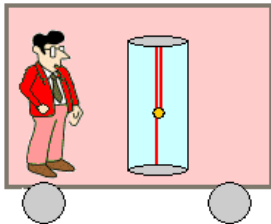
Die Uhr steht still



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

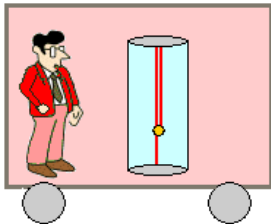
Die Uhr steht still



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

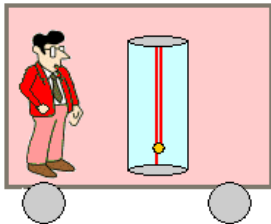
Die Uhr steht still



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

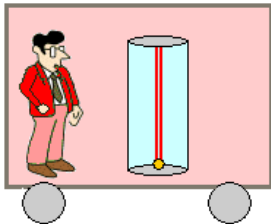
Die Uhr steht still



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

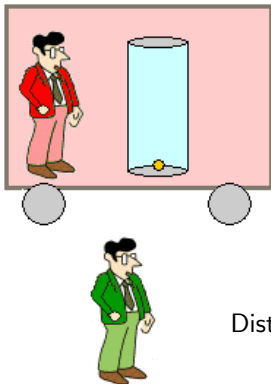
Die Uhr steht still



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

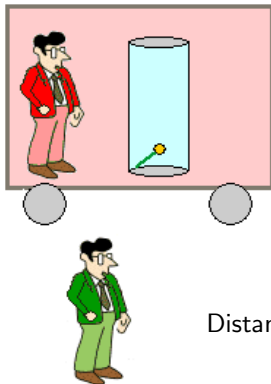
Die Uhr bewegt sich



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

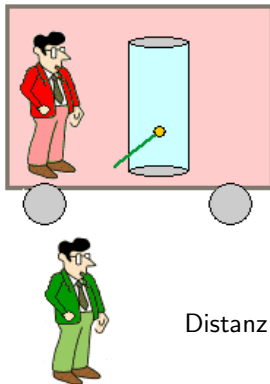
Die Uhr bewegt sich



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

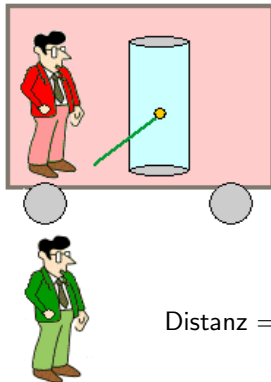
Die Uhr bewegt sich



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

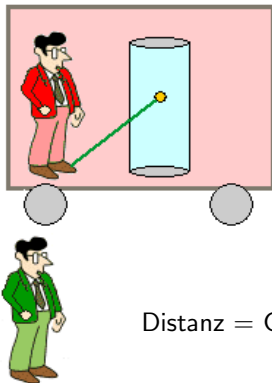
Die Uhr bewegt sich



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

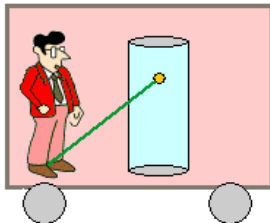
Die Uhr bewegt sich



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

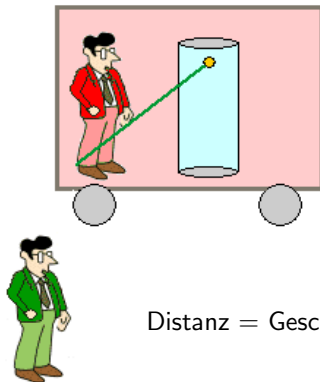
Die Uhr bewegt sich



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

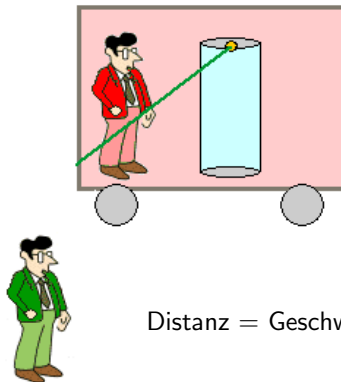
Die Uhr bewegt sich



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

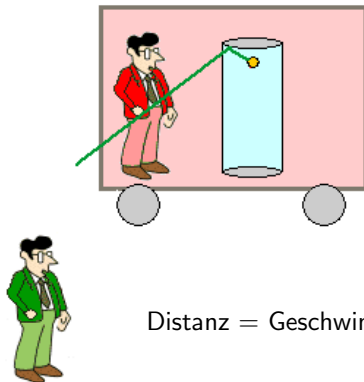
Die Uhr bewegt sich



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

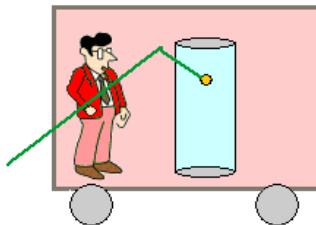
Die Uhr bewegt sich



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

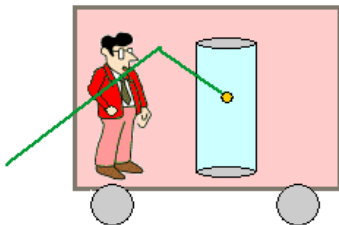
Die Uhr bewegt sich



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

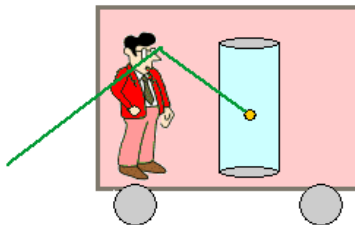
Die Uhr bewegt sich



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

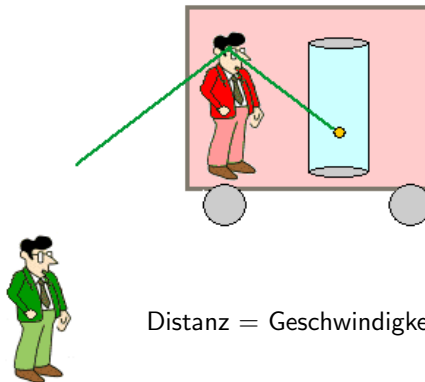
Die Uhr bewegt sich



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

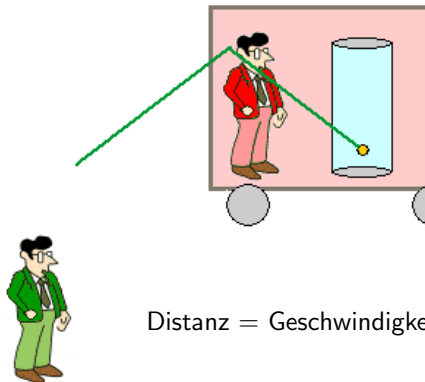
Die Uhr bewegt sich



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

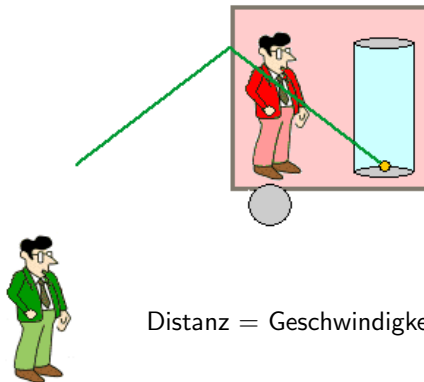
Die Uhr bewegt sich



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

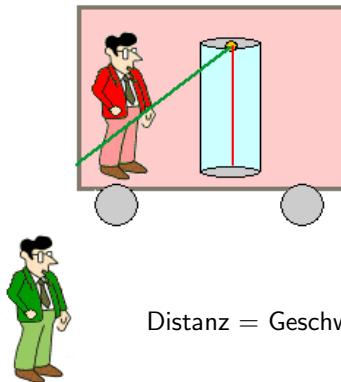
Die Uhr bewegt sich



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

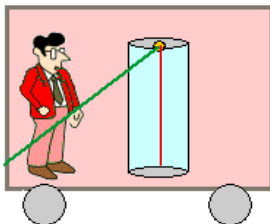
Bewegte Uhren gehen langsamer

Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016



$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

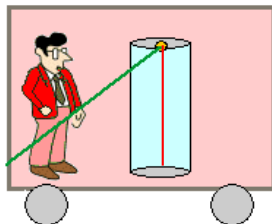


Distanz = Geschwindigkeit \times Zeit

Distanz = Geschwindigkeit \times Zeit

Bewegte Uhren gehen langsamer

Die Lichtgeschwindigkeit ist **IMMER** gleich gross, $c = 300'000 \text{ km/sec}$

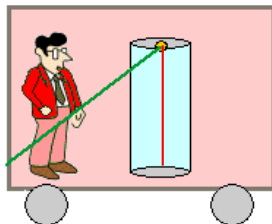


$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

Die Lichtgeschwindigkeit ist **IMMER** gleich gross, $c = 300'000 \text{ km/sec}$

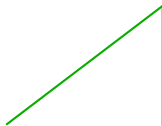


$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

$$\text{Distanz} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

Die Lichtgeschwindigkeit ist **IMMER** gleich gross, $c = 300'000 \text{ km/sec}$



Bewegte Uhren gehen langsamer

Die Lichtgeschwindigkeit ist **IMMER** gleich gross, $c = 300'000 \text{ km/sec}$



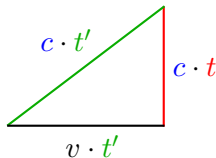
Bewegte Uhren gehen langsamer

Die Lichtgeschwindigkeit ist **IMMER** gleich gross, $c = 300'000 \text{ km/sec}$

Uhr steht still: t

Uhr bewegt sich: t'

Geschwindigkeit der Uhr: v



Satz von Pythagoras: $(c \cdot t)^2 + (v \cdot t')^2 = (c \cdot t')^2$

Bewegte Uhren gehen langsamer

Die Lichtgeschwindigkeit ist **IMMER** gleich gross, $c = 300'000 \text{ km/sec}$

Uhr steht still: t

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Satz von Pythagoras: $(c \cdot t)^2 + (v \cdot t')^2 = (c \cdot t')^2$

Bewegte Uhren gehen langsamer

Ein GPS-Satellit fliegt mit 3.9 km/sec. Wie lange dauert es von uns aus gesehen, bis seine Uhr um 1 Sekunde vorgerückt ist?

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

Ein GPS-Satellit fliegt mit 3.9 km/sec. Wie lange dauert es von uns aus gesehen, bis seine Uhr um 1 Sekunde vorgerückt ist?

$$t' = \frac{1 \text{ sec}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

Ein GPS-Satellit fliegt mit 3.9 km/sec. Wie lange dauert es von uns aus gesehen, bis seine Uhr um 1 Sekunde vorgerückt ist?

$$t' = \frac{1 \text{ sec}}{\sqrt{1 - \frac{(3.9 \text{ km/sec})^2}{c^2}}}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

Ein GPS-Satellit fliegt mit 3.9 km/sec. Wie lange dauert es von uns aus gesehen, bis seine Uhr um 1 Sekunde vorgerückt ist?

$$t' = \frac{1 \text{ sec}}{\sqrt{1 - \frac{(3.9 \text{ km/sec})^2}{(300'000 \text{ km/sec})^2}}}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

Ein GPS-Satellit fliegt mit 3.9 km/sec. Wie lange dauert es von uns aus gesehen, bis seine Uhr um 1 Sekunde vorgerückt ist?

$$t' = \frac{1 \text{ sec}}{\sqrt{1 - \frac{(3.9 \text{ km/sec})^2}{(300'000 \text{ km/sec})^2}}} = 1.000000000085 \text{ sec}$$

Bewegte Uhren gehen langsamer

Ein GPS-Satellit fliegt mit 3.9 km/sec. Wie lange dauert es von uns aus gesehen, bis seine Uhr um 1 Sekunde vorgerückt ist?

$$t' = \frac{1 \text{ sec}}{\sqrt{1 - \frac{(3.9 \text{ km/sec})^2}{(300'000 \text{ km/sec})^2}}} = 1.000000000085 \text{ sec}$$

Von uns aus gesehen geht die Satellitenuhr nach einer Sekunde um 85 billionstel Sekunden nach.

Würde Albert einem GPS vertrauen?

- Spezielle Relativitätstheorie
 - 1 sec \rightarrow 1.000000000085 sec

Würde Albert einem GPS vertrauen?

- Spezielle Relativitätstheorie
 - 1 sec \rightarrow 1.000000000085 sec
- Allgemeine Relativitätstheorie: GPS-Uhren in 20'200 km Höhe ticken schneller
 - 1 sec \rightarrow 0.99999999947 sec

Würde Albert einem GPS vertrauen?

- Spezielle Relativitätstheorie
 - 1 sec \rightarrow 1.000000000085 sec
- Allgemeine Relativitätstheorie: GPS-Uhren in 20'200 km Höhe ticken schneller
 - 1 sec \rightarrow 0.99999999947 sec
- Beide Effekte zusammen bewirken, dass die Satelliten-Uhr vom Boden aus gesehen zu schnell läuft
 - 1 sec \rightarrow 0.99999999956 sec
 - 38 millionstel Sekunden pro Tag

Würde Albert einem GPS vertrauen?

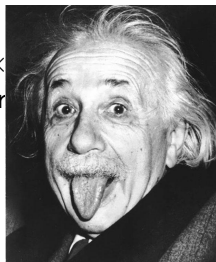
- Spezielle Relativitätstheorie
 - 1 sec \rightarrow 1.000000000085 sec
- Allgemeine Relativitätstheorie: GPS-Uhren in 20'200 km Höhe ticken schneller
 - 1 sec \rightarrow 0.99999999947 sec
- Beide Effekte zusammen bewirken, dass die Satelliten-Uhr vom Boden aus gesehen zu schnell läuft
 - 1 sec \rightarrow 0.99999999956 sec
 - 38 millionstel Sekunden pro Tag
- Distanz zum Satelliten = Lichtgeschwindigkeit \times Zeit

Würde Albert einem GPS vertrauen?

- Spezielle Relativitätstheorie
 - 1 sec \rightarrow 1.000000000085 sec
- Allgemeine Relativitätstheorie: GPS-Uhren in 20'200 km Höhe ticken schneller
 - 1 sec \rightarrow 0.99999999947 sec
- Beide Effekte zusammen bewirken, dass die Satelliten-Uhr vom Boden aus gesehen zu schnell läuft
 - 1 sec \rightarrow 0.99999999956 sec
 - 38 millionstel Sekunden pro Tag
- Distanz zum Satelliten = Lichtgeschwindigkeit \times Zeit
Distanzfehler = Lichtgeschwindigkeit \times Zeitfehler
 - = 13 cm nach 1 Sekunde
 - = 480 m nach 1 Stunde
 - = 11.5 km nach 1 Tag

Würde Albert einem GPS vertrauen?

- Spezielle Relativitätstheorie
 - 1 sec \rightarrow 1.000000000085 sec
- Allgemeine Relativitätstheorie: GPS-Uhren in 20'200 km Höhe ticken schneller
 - 1 sec \rightarrow 0.99999999947 sec
- Beide Effekte zusammen bewirken, dass die Satelliten-Uhr vom Boden aus gesehen zu schnell läuft
 - 1 sec \rightarrow 0.99999999956 sec
 - 38 millionstel Sekunden pro Tag
- Distanz zum Satelliten = Lichtgeschwindigkeit \times Distanzfehler = Lichtgeschwindigkeit \times Zeitfehler
 - = 13 cm nach 1 Sekunde
 - = 480 m nach 1 Stunde
 - = 11.5 km nach 1 Tag



Albert täte gut daran, GPS nicht blind zu vertrauen!

Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

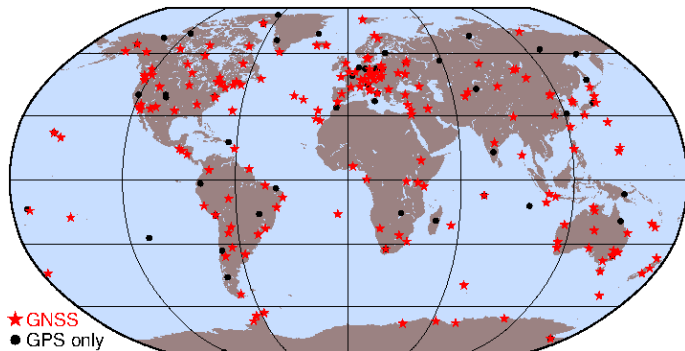
Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...



Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...
... und bestimmt so u.a. hochgenau

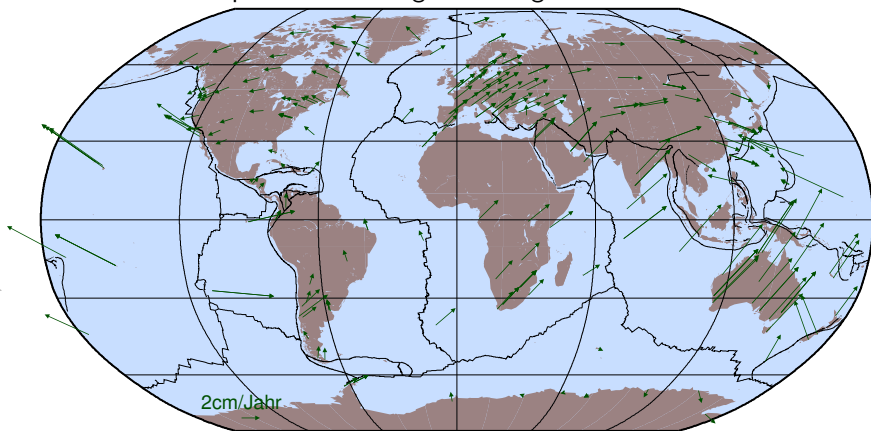
- die Stationspositionen



Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten

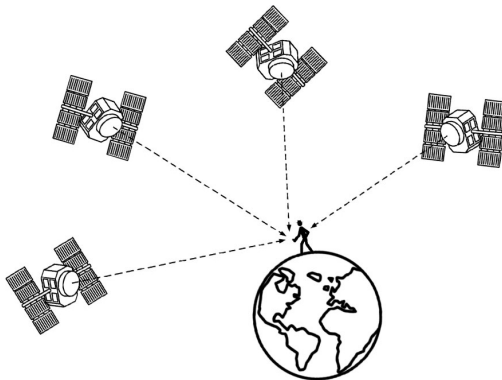


Daniel Arnold: Würde Albert einem GPS vertrauen?
Eine Nacht mit Albert, 3. Juni 2016

Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...
... und bestimmt so u.a. hochgenau

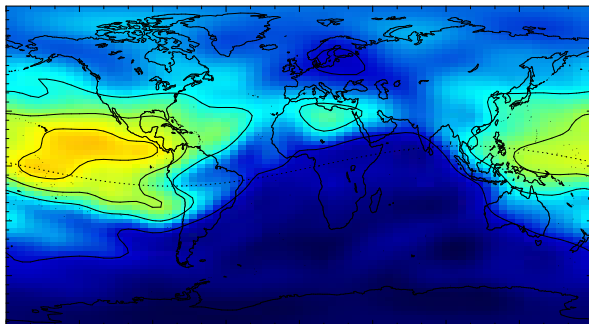
- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten



Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

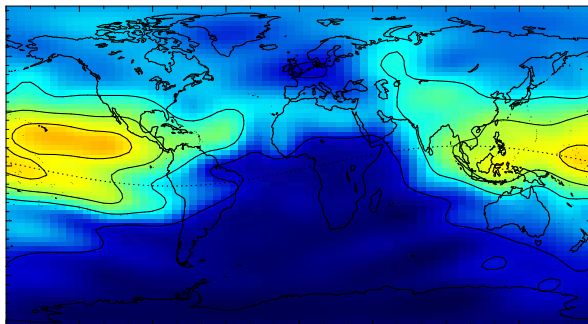


00:00 UT

Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

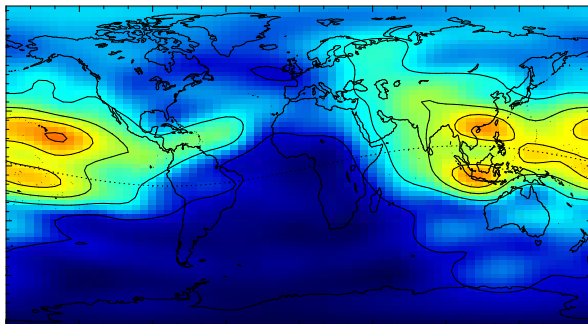


02:00 UT

Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

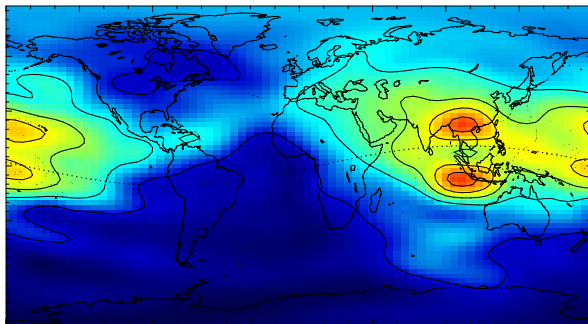


04:00 UT

Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

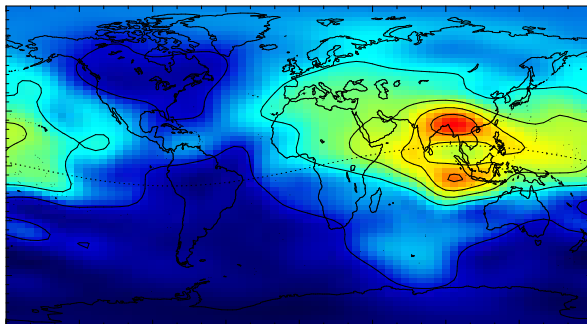


06:00 UT

Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

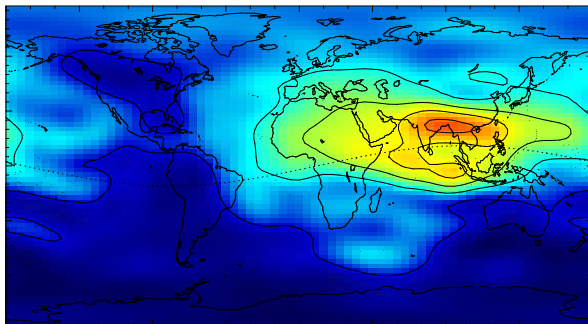


08:00 UT

Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

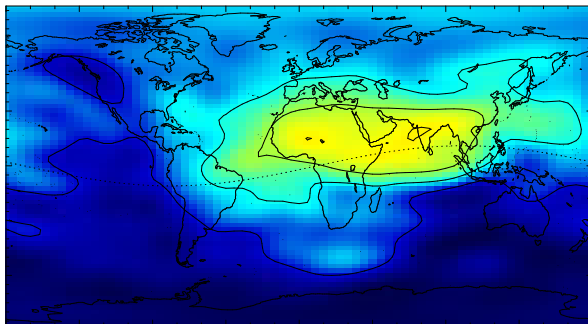


10:00 UT

Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

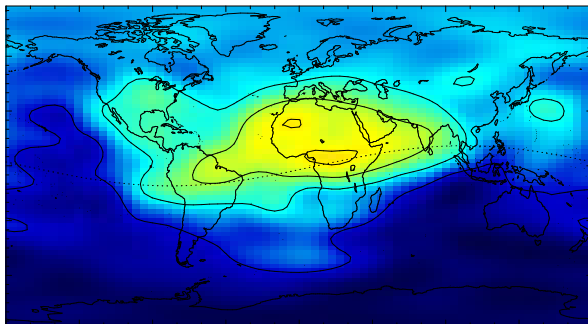


12:00 UT

Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

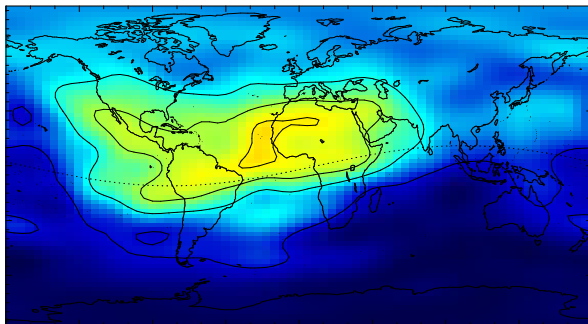


14:00 UT

Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

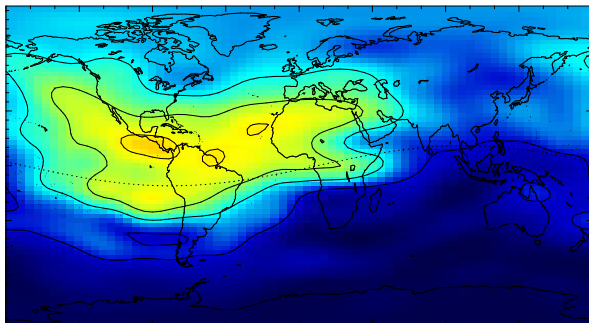


16:00 UT

Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

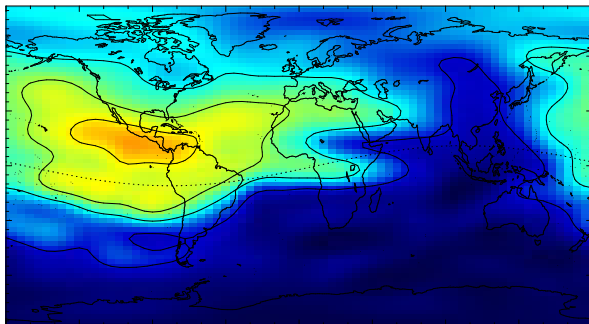


18:00 UT

Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

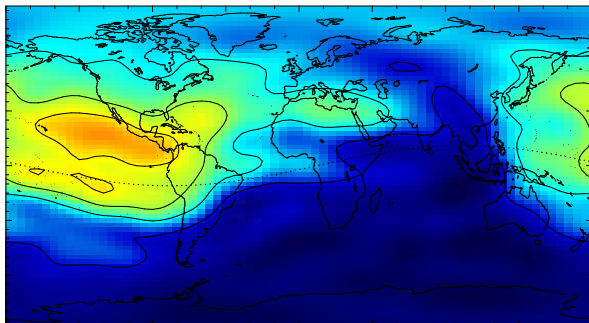


20:00 UT

Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre

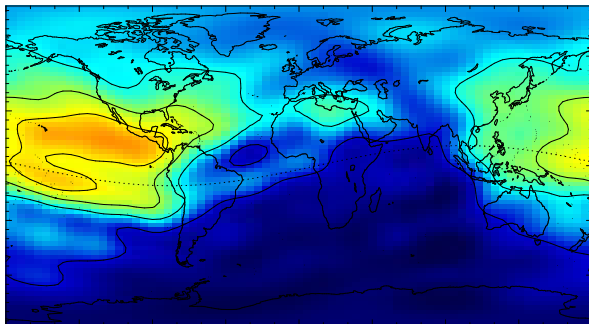


22:00 UT

Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre



24:00 UT

Wissenschaftliche Anwendungen von GPS

Das AIUB wertet, als eines von mehreren Analysezentren, jeden Tag Daten von mehr als 250 GPS-Stationen weltweit aus...

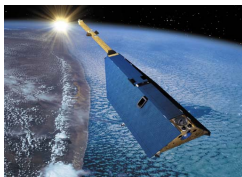
... und bestimmt so u.a. hochgenau

- die Stationspositionen und -geschwindigkeiten
- die Bahnen der GPS (und GLONASS)-Satelliten
- die Elektronendichte in der Ionosphäre
- ... und vieles mehr

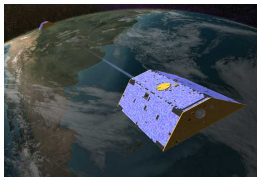
Bahnbestimmung tieffliegender Satelliten

Zahlreiche Satelliten, die in einer Höhe zwischen 250-2000 km fliegen, haben einen GPS-Empfänger an Bord. Dies erlaubt die cm genaue Bestimmung der Satellitenbahnen.

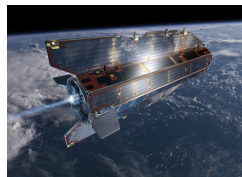
CHAMP



GRACE



GOCE



Jason



Jason-2



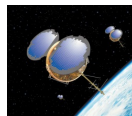
MetOp-A



ICESat



COSMIC



Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).

Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

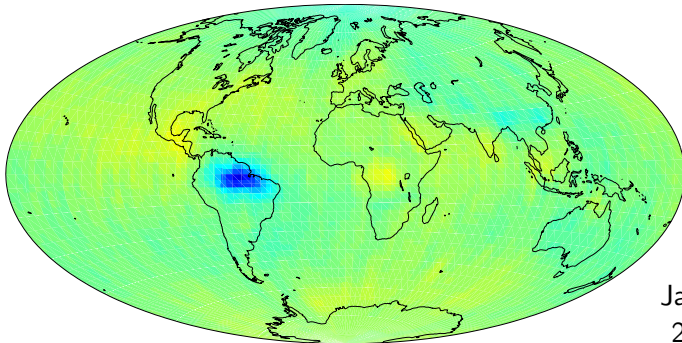
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.

Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.

Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

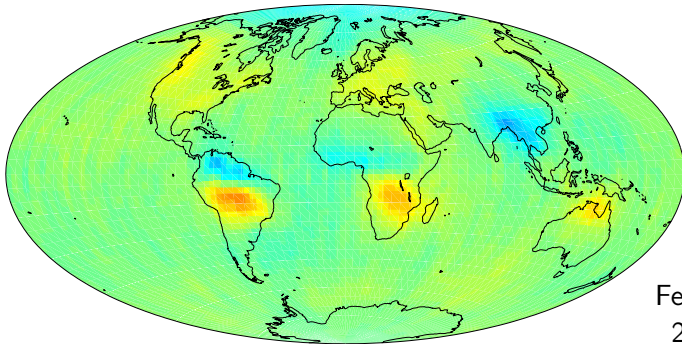
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



Januar
2007

Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

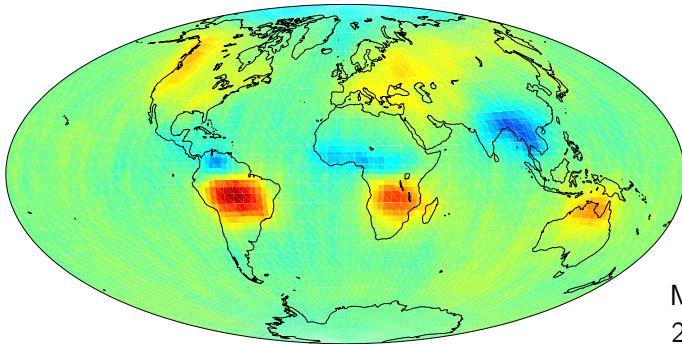
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



Februar
2007

Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

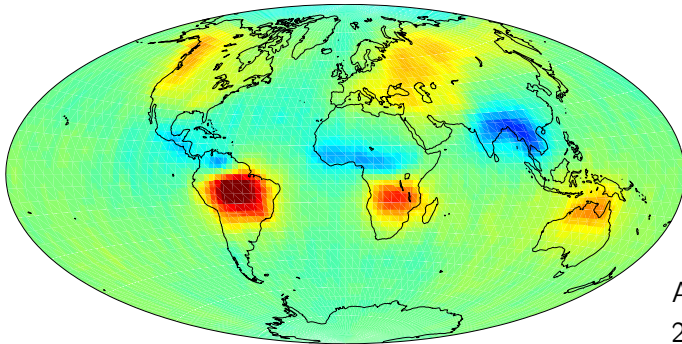
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



März
2007

Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

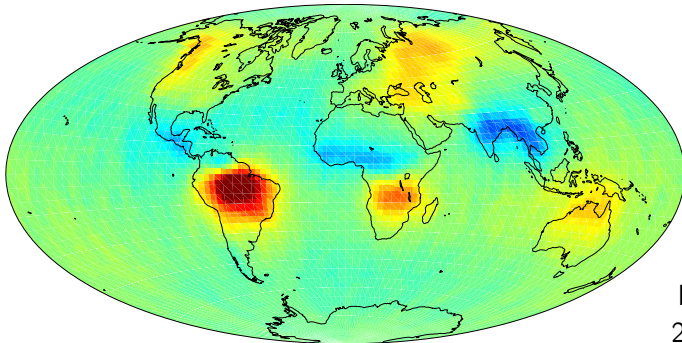
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



April
2007

Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

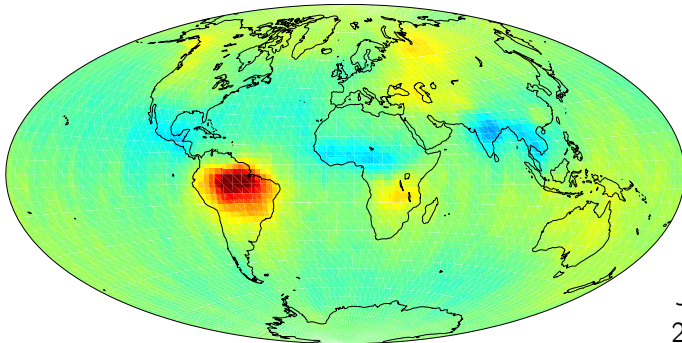
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



Mai
2007

Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

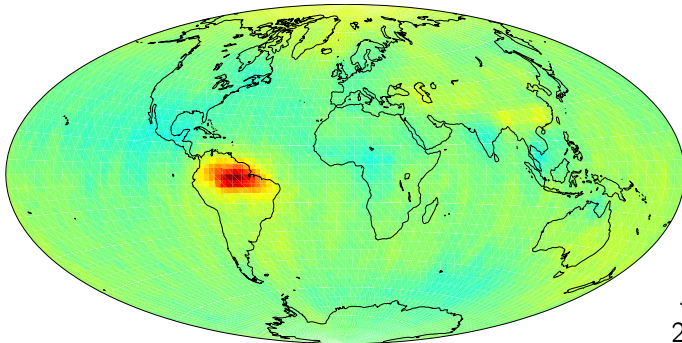
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



Juni
2007

Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

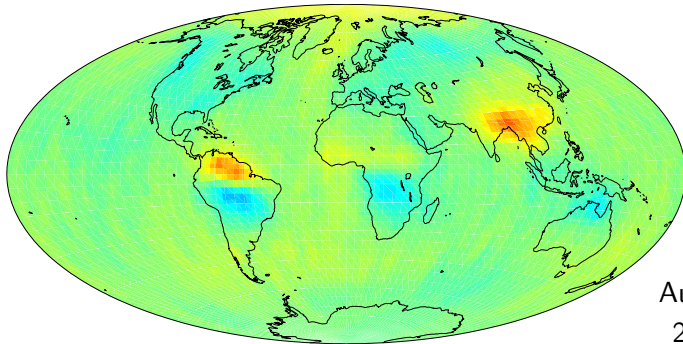
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



Juli
2007

Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

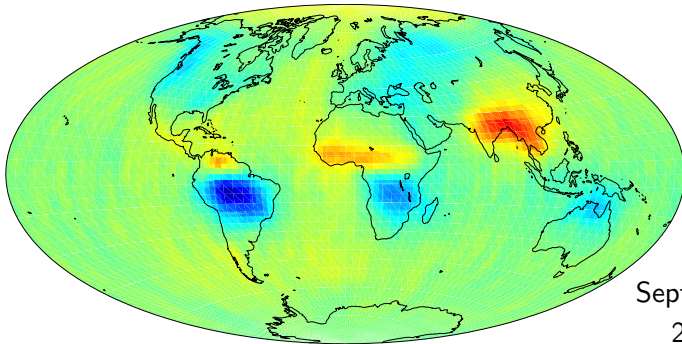
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



August
2007

Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

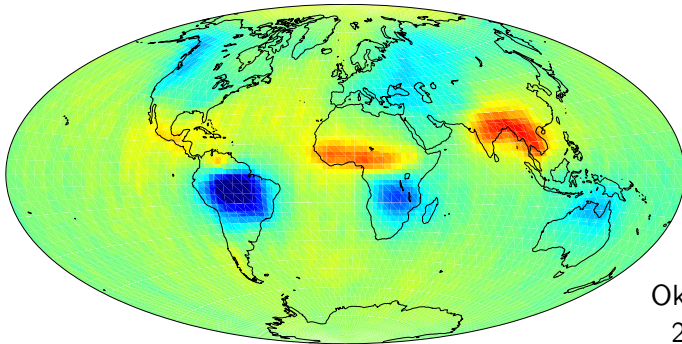
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



September
2007

Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

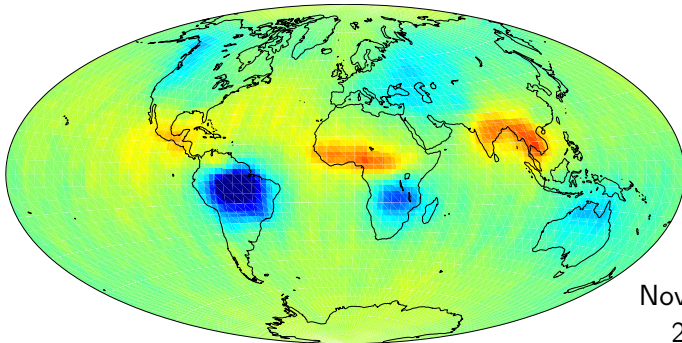
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



Oktober
2007

Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

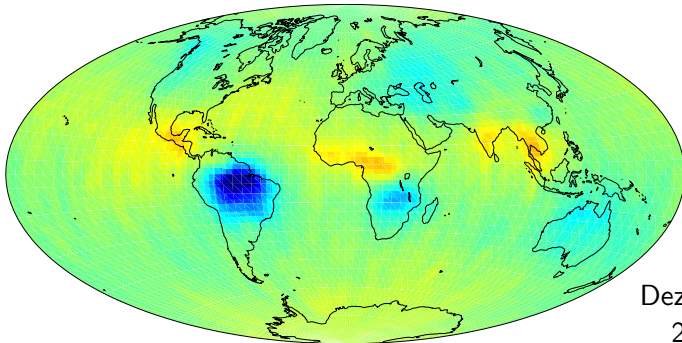
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



November
2007

Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

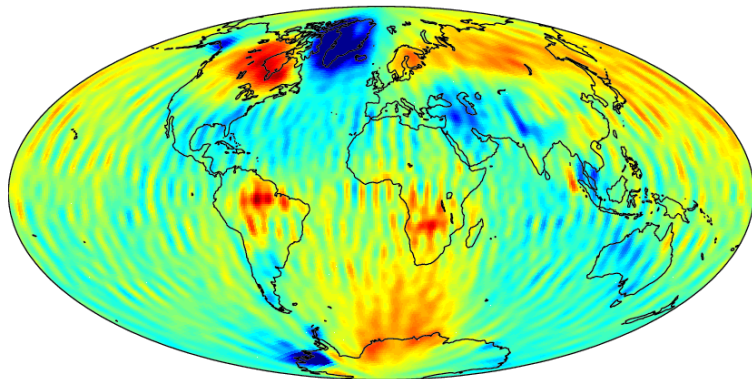
- Das Schwerefeld der Erde ist nicht konstant, sondern hängt ab von der Massenverteilung (Erdinneres, Ozeane, Atmosphäre, ...).
- Die Unterschiede beeinflussen die Flugbahnen der Satelliten.
- Kann man die Bahn sehr genau bestimmen (GPS!), so erlaubt die Analyse der Bahnstörungen Rückschlüsse auf das Schwerefeld.



Dezember
2007

Schwerefeldbestimmung aus Satellitenbahnen

Änderung des Schwerefelds im Zeitraum 2003-2009:



Das Eisschmelzen in Grönland und in der Antarktis ist deutlich zu sehen!

Vielen Dank!

